

УДК 658.51.012

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕХОДНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

ANALYSIS OF THE MODELS OF TRANSITION PROCESSES CONTROLLED MANUFACTURING

О.М. Пигнастый

O.M. Pignasty

Национальный технологический университет "Харьковский политехнический институт", Украина, 61000, Харьков, ул. Фрунзе, 21

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 21 Frunze St, Kharkiv, 61000, Ukraine

e-mail: pom7@bk.ru

Аннотация. В статье приведен обзор и дан краткий анализ моделей производственных поточных линий, функционирующих в переходных режимах. Приведена оценка точности расчетов параметров производственных поточных линий, выполненных с применением анализируемых моделей. Особое внимание уделено статистическим моделям поточных линий. Показана связь статистических моделей поточных линий с новым классом моделей, известным как PDE-модели поточных линий. Основываясь на проведенном анализе, представлены направления перспективного развития моделей в системах управления производственными поточными линиями.

Resume. This article provides an overview and a brief analysis of the models of industrial production lines operating under transient conditions. The article assesses the accuracy of calculation of parameters of industrial production lines for the analyzed models. Particular attention is paid to statistical models of production lines. The article shows the relationship of the statistical models of production lines and PDE-model production lines. The analysis ends with presentation of directions of perspective development model in the management of production flow lines.

Ключевые слова: PDE-модели поточных линий, система управления поточным производством, статистические модели производственных систем

Keywords: PDE-model production lines, production management system, statistical models of manufacturing systems

Введение

Эффективность системы управления производственными поточными линиями определяется многими факторами, среди которых важное место занимает выбор модели управляемого производственного процесса и алгоритма управления (рис.1). Этот выбор в значительной мере определяется структурой жизненного цикла производимых изделий, динамикой изменения во времени основных параметров, характеризующих состояние фазы жизненного цикла и продолжительностью отдельных его стадий, связанных непосредственно с процессом производства (рис.2). Характерной чертой, определяющей выбор систем управления поточными линиями для большинства производственных предприятий в прошлом столетии, являлось наличие в структуре жизненного цикла промежутка времени продолжительностью T_k (рис.2), связанного с процессом производства, который характеризовался медленным изменением во времени объема производства. Это позволяло использовать для описания производственного процесса квазистатистические модели производственных процессов [1-3].



Рис. 1. Многомерная распределенная система управления поточной линией

Fig. 1. Multivariate distributed control for production line

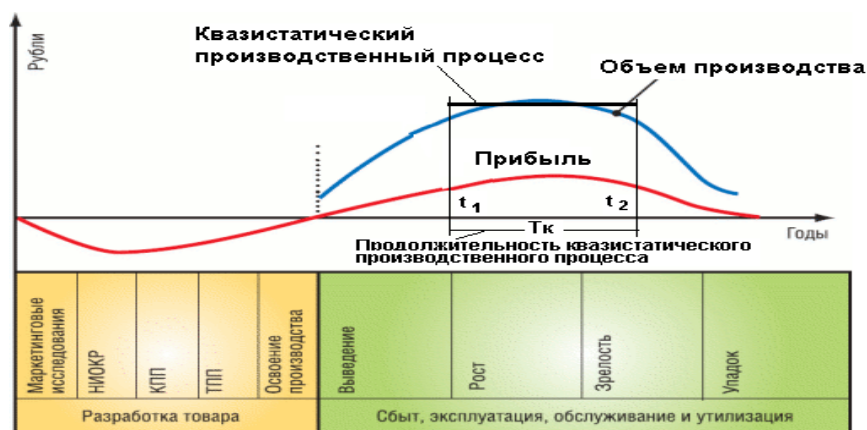


Рис. 2. Фазы жизненного цикла
Fig. 2. Phases of the product life cycle

Одной из основных тенденций развития современного промышленного производства является постоянное сокращение продолжительности жизненного цикла производимых изделий. Ярким примером тому является 2-х летняя модель развития Intel (рис.3). Продолжительность жизненного цикла ограничена и определяется промежутком времени, который требуется для замены одной технологии производства другой технологией [4].

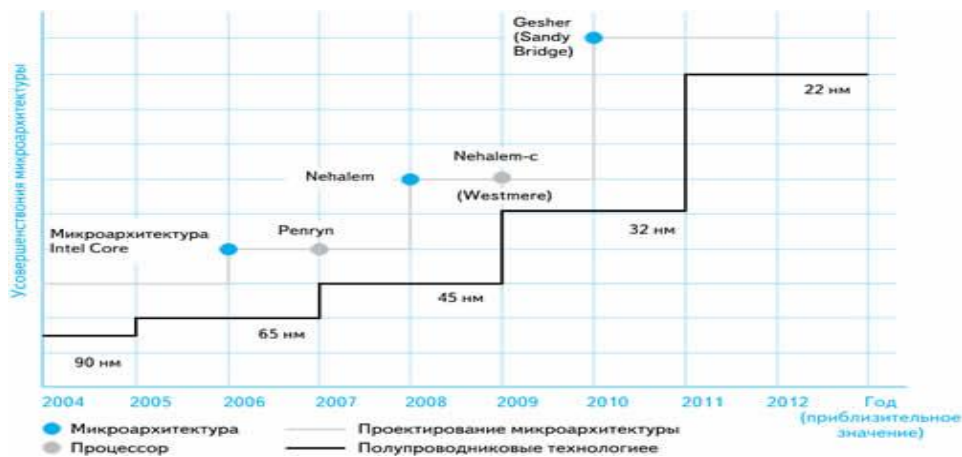


Рис.3. Двухлетняя модель развития Интел [4]
Fig. 3. The two-year development model Intel [4]

Это, приводит к тому, что а) с одной стороны производственные линии значительную долю времени функционирует в переходном неустановившемся режиме; б) с другой стороны время, отводимое на поиск режима управления технологическими участками поточной линией сокращается, исчисляется минутами или даже секундами [2, с. 139]. Сокращение длительности жизненного цикла продукта приводит к сильной деформации участка жизненного цикла продолжительностью T_k , который характеризовался на рисунке 2 медленным изменением во времени объема производства [5]. Производство вынуждено функционировать в режиме перехода от состояния с одним объемом производства к состоянию с измененным объемом производства. Плато (рис.2), соответствующее постоянному объему производства, исчезает (рис. 4). В связи с этим при проектировании систем управления производственными линиями для переходных режимов в последнее десятилетие особое внимание уделяется использованию совершенно новых типов моделей управляемых производственных процессов, а также программ и алгоритмов управления ими. Применение распространенных квазистатических моделей становится недопустимым [1, 2]. О высокой актуальности проблемы свидетельствует тот факт, что ведущие мировые предприятия (Intel Corporation, Volkswagen AG, Royal Philips) наряду с финансированием многочисленных научных грантов, создали экспериментальные лаборатории по исследованию переходных режимов. Современному производству необходимы надежные, не требующие значительных вычислительных ресурсов модели, позволяющие описать поведение параметров

производственных линий как для квазистатических, так и для неуставившихся переходных режимов с целью решения соответствующих задач управления. Процесс управления современным производством усложняется тем, что поточные линии предприятий являются многономенклатурными, состоят из значительного количества технологических операций, в межоперационных заделах которых находится большое число предметов труда, используют множество разных видов технологических ресурсов. Технологические маршруты изделий разных номенклатур пересекаются. Многие технологические операции выполняются на одном и том же оборудовании, что требует расстановки приоритетов обработки и потребления ресурсов. Для управления поточной линией используются многомерные системы управления, сложность которых достигла предела. Обзор [2] современных публикаций показал, что для описания работы поточных линий задействованы три основных типа моделей.

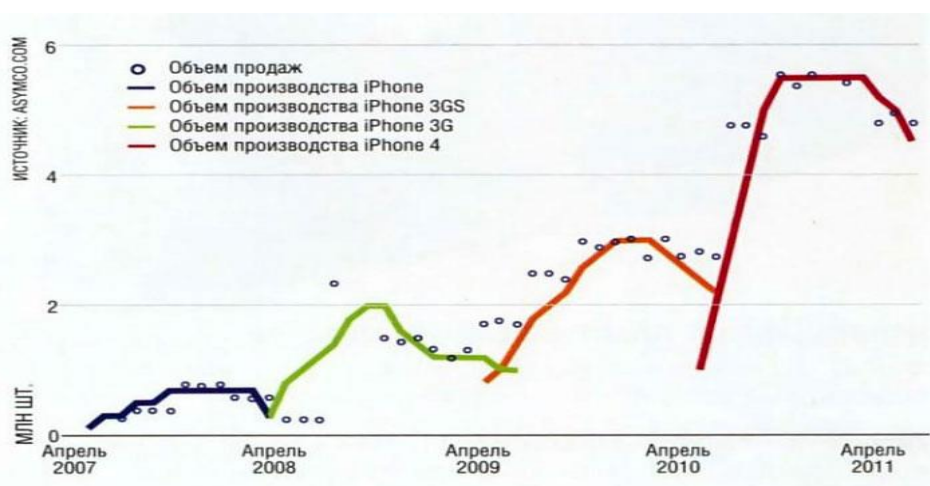


Рис.4. Жизненный цикл iPhone[5]

Fig. 4. Life Cycle iPhone [5]

Первый тип моделей – это модели теории массового обслуживания (TQ-модели). Используются для одномоментного описания поточных линий из небольшого количества операций, функционирующих, как правило, в установившемся квазистатическом режиме. Применение их многомоментного описания поточных линий и для моделирования переходных неуставившихся режимов приводит к чрезмерному усложнению модели и большим затратам вычислительных и временных ресурсов. Второй тип моделей – дискретно-событийные модели (DES-модели). Требуют для этого больших затрат вычислительных и временных ресурсов в связи с многократной имитацией технологического процесса, состоящего из значительного количества технологических операций, в межоперационных заделах которых содержится большое количество предметов труда. Многолетний опыт применения DES-моделей компанией Интел показывает, что результаты вычислений хорошо совпадают с результатами эксперимента [6], но расчетное время для характерных значений параметров поточной линии составляет около суток. Это делает невозможным их эффективное применение. Не пригодны для построения аналитических зависимостей между параметрами проектируемых линий. Требуют использования устойчивых вычислительных алгоритмов. Третий тип моделей – Модели жидкости (Fluid-модели). Широко известна их разновидность, представленная направлением системной динамики. Ориентированы на малое количество интервалов разбиения технологического маршрута и линейные стационарные решения. Основные причины, не позволяющие эффективно использовать данные модели – это высокая размерность и сложность построения замкнутой многомоментной нелинейной системы уравнений, что снижает точность описания. Каждый тип моделей имеет свои преимущества, но ни один из них в полной мере не подходит для полноценного описания поточных линий, функционирующих в переходных неуставившихся режимах [5].

Модели поточных линий, функционирующие в переходном режиме.

Проблемным является вопрос построения систем управления для поточных линий, функционирующих в переходном режиме. Как указано выше, в современных условиях жизненный цикл продукта для предприятия с поточным типом организации производства является достаточно коротким. Для полупроводникового продукта жизненный цикл не превышает одного года, в то время как длительность производственного цикла составляет 40-60 дней, а внедрение и



запуск нового изделия занимает несколько месяцев. В связи с этим поточная линия только незначительную часть времени функционирует в установившемся состоянии [6, с. 4589]. Поэтому при проектировании современных систем управления поточными линиями уделяется особое внимание построению моделей для неустановившихся переходных режимов, когда параметры системы находятся в неустойчивом состоянии [7]. Требуемые значительных вычислительных ресурсов DES-модели успешно применяются для детального описания устойчивых переходных режимов функционирования поточной линии [2,8,9]. Если же для поточной линии не выполняются критерии устойчивости, то результат моделирования в значительной степени становится зависимым от выбранной вычислительной схемы. Использование clearing-функций для переходных процессов требует особого подхода [1,2]. Clearing-функция позволяет замкнуть систему PDE-уравнений, но применение модели дает удовлетворительную точность только для систем, находящихся в квазистационарных устойчивых состояниях. Попытки создать TQ-модели для переходных процессов, описывающих поведение сетей массового обслуживания представлены в работе Riano G. (2003) [10]. Selçuk B., Fransoo J., Gok A. (2007) [11] использовали для описания переходных процессов стохастическую clearing-функцию. Созданием моделей переходных процессов занимались Armbruster D., Ringhofer C., Bramson M., Kempf K. [6]. Однако возмущение, возникшее в пределах рассматриваемого горизонта планирования, как правило, делало недействительным рассчитанный с помощью модели для переходного режима оптимальный план производства (Armbruster D., Marthaler D., Ringhofer C.) [12]. Устойчивость параметров производственных линий рассмотрели Lefebvre E. (2004) [13], Missbauer H. (2009) [14]. Подчеркнуто, что устойчивость параметров задается критериями, определяющими связь между плотностью предметов труда и величиной темпа их движения по технологическому маршруту. Armbruster D., Kempf K.G. (по производству компании Intel) показали (2012) [15], что для обеспечения устойчивости отклонения производственной мощности от нормативного значения достигают 20%. Устойчивость параметров поточных линий, представленных TQ- и Fluid-моделями подробно рассмотрели Bramson M. (2008) [16] и Dai (2004) [17,18].

Одним из подходов к построению систем управления поточными линиями в неустановившихся режимах является использование диспетчерской теории управления (The supervisory control theory, SCT, Ramadge P., Wonham W., 1987) [19]. В настоящее время данная теория, основанная на дискретно-событийном описании поточных линий, используется многими авторами. При управлении большими производственными системами, сложность модели SCT-управления чрезмерно возрастает из-за высокого уровня детализации DES-модели. Cassandra C. (2002) [20], Harrison J. (1995) [21], Kimemia J. (1983) [8] предложили для построения систем управления производством использовать Fluid-модели, имеющие меньший уровень детализации. Однако, рассмотренные в работах Cassandra C., Harrison J. и Kimemia J. Fluid-модели хотя и обладали меньшим временем вычислений, но в отличие от DES-моделей не дали точного описания динамики движения изделий по операциям [22], что не позволило определить с достаточной степенью точности продолжительность производственного цикла. По своей природе Fluid-модели способны учитывать переходные эффекты при использовании поправочных эмпирических коэффициентов для уравнений темпов [23]. В то же время класс PDE-моделей [3], основанный на уравнениях в частных производных, позволяет получить с достаточной степенью точности балансовые уравнения, описывающие темп движения предметов труда, как для переходного, так и для установившегося состояния, что дает возможность строить эффективные модели систем управления современными поточными линиями.

Значительные усилия исследователей были направлены на постановку задач оптимизации параметров одномоментных PDE-моделей. La Marca рассмотрел в одномоментном приближении задачу оптимизации величины потока заказов для конечного интервала времени T [24]:

$$J(\rho(t, x), \lambda(t)) = \frac{1}{2} \int_0^T (d(t) - F(t, 1))^2 dt \rightarrow \min, \quad F(t, x) = \frac{\mu_0}{1 + \int_0^1 \rho(t, z) dz} \rho(t, x) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial \rho(t, x) \cdot v(t, x)}{\partial x} = 0, \quad \rho(0, x) = \rho_0(x), \quad \rho(t, 0) \cdot v(t, 0) = \lambda(t), \quad (2)$$

где $d(t)$ - мгновенная скорость спроса, $F(t, 1)$ - темп выхода продукции с завода. Минимизация расходов определена условием (1) при наличии ограничений на фазовые переменные (2). Результаты расчетов с использованием модели (1), (2) показали, что темп выхода продукции как функция времени повторяет качественно поведение функции спроса, сдвинутой по фазе на определенную величину.

Управление параметрами поточной линии сводится, в основном, к управлению параметрами технологических модулей, расположенных вдоль технологического маршрута, состоящих из оборудования и межоперационного накопителя [25]. Основными параметрами технологического модуля являются его производительность и величина страховых запасов в межоперационных накопителях. Таким образом, управление $U(t, x)$ должно быть функцией, как времени t , так и координаты x , определяющей положение предметов труда и оборудования в технологическом маршруте. Однако, вид функции распределенного вдоль технологического маршрута управления $U(t, x)$ для поточных линий не определен [26]. При этом особый интерес представляет разработка метода построения моделей для задач стабилизации потоковых параметров линии, в которых управление $U(t, x)$ определяется с применением функций Ляпунова [26].

Оценка точности расчета в моделях управляемых производственных процессов

Оценку точности PDE-моделей выполнил Berg R.A., Lefebvre E., Rooda J.E. с помощью DES-моделей. Проведен анализ результатов расчетов параметров поточной линии, полученных с помощью DES-моделей, M/M/1-моделей и PDE-моделей [26]:

$$\frac{\partial \rho(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial F(t, x)}{\partial x} = 0, \quad v(t) = \frac{\mu}{M + W(t)}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial q(t, x)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v(t, x)}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial v(t, x)^2}{\partial x} = 0, \quad v(t, 0) = \frac{\mu}{M + W(t)}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial F(t, x)}{\partial x} = 0, \quad v(t, x) = \frac{\mu}{M + \rho(t, x)}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial F(t, x)}{\partial x} = 0, \quad F(t, x) = C(t) \cdot \rho(t, x) - D(t) \frac{\partial \rho(t, x)}{\partial x}, \quad C(t) = \frac{1}{\tau(t, x)}, \quad (6)$$

где $F(t, x) = \rho(t, x) \cdot v(t, x)$ – с поток предметов труда, M – количество единиц оборудования вдоль технологического маршрута, используемого для обработки партии предметов труда, $\tau(t, x)$ – эффективное время обработки, $D(t)$ – коэффициент диффузии, определяемый в результате исследования экспериментальных технологических траекторий предметов труда. Показано, что результаты вычислений, полученные с помощью уравнений PDE-модели в одномоментном приближении, с достаточной степенью точности соответствуют результатам вычислений, полученных для стационарного случая с помощью DES-модели и M/M/1-модели. Модель (3) (Armbruster D.) основана на LWR-модели (Lighthill M.J., Whitham J.B., Richards P.I.) [27], используемой для описания процесса передачи трафика. Модель включает уравнение неразрывности, представляющее закон сохранения количества предметов труда, и статическое соотношение между скоростью движения предметов труда $v(t) = \frac{\mu}{M + W(t)}$ и их количеством в

незавершенном производстве $W(t)$, где μ – интенсивность обработки предметов труда на одной из M одинаковых единиц оборудования. Скорость движения предметов труда $v(t)$ не зависит от координаты, равномерна в каждом месте поточной линии. Модель (2) используется для грубых расчетов [12]. Модель (4) (Armbruster D.) [12] дополняется уравнением Бюргерса для скорости с начальным $v(0, x) = \rho_0(x)$ и граничным $v(t, 0) = \frac{\mu}{M + W(t)}$ условиями. Скорость $v(t, 0)$ используется

только в качестве левого граничного условия, а не для всей линии как для модели (3). Скорость движения предметов труда $v(t, x)$ переменна вдоль технологического маршрута и не зависит от плотности. Модель (5) включает уравнение неразрывности и статическое соотношение между скоростью $v(t, x)$ и плотностью $\rho(t, x)$ (LWR-модель). Статическое соотношение, в основе которого лежит M/M/1-модель [28], показывает сходство с уравнением в модели (3). Однако скорость $v(t, x)$ не зависит от незавершенного производства $W(t)$ всей системы, а связана только с локальной плотностью. Таким образом, скорость $v(t, x)$ может меняться вдоль технологического маршрута. Правая граница предполагается свободной. Сочетание первых двух уравнений модели (5) дает уравнение



$$\frac{\partial \rho(t, x)}{\partial t} + \frac{\mu \cdot m}{(m + \rho(t, x))^2} \frac{\partial \rho(t, x)}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Численные расчеты показали, что модель (4) и (5) имеет одинаковую производительность [26, с.33]. Модель (5) (Lefebvre E. [26,29]) описывает поведение скорости $v(t, x)$ в зависимости от плотности $\rho(t, x)$. Расчеты показывают, что время переходного периода при этом занижено. Добавление диффузионной добавки [26, с. 32] позволило повысить точность расчетов. Рассмотренные модели (3)-(5) хорошо описывают стационарные режимы функционирования производственной линии. Для описания переходных режимов предпринята попытка дополнить модели (3)-(5) поправочными диффузионными слагаемыми [26, с.23], [6, с.4593], позволяющими в отдельных случаях повысить точность описания. В модели (6), полученной Armbruster D., Ringhofer C. [6, с. 4593], уравнение состояния $F(t, x)$ содержит поправочный член $D(t) \frac{\partial \rho(t, x)}{\partial x}$, характеризующий рассеивание экспериментальных технологических траекторий с коэффициентом диффузии $D(t) = 0.6 \cdot 10^4 \pm 35\%$ (1/день).

Детально исследовал точность расчета пропускной способности производственной линии и времени обработки партии предметов труда для переходного и стационарного случая Berg (2008) [26]. Технологический процесс состоял из 10-ти идентичных рабочих станций ($M=10$), имеющих буфер и оборудование. Буфер предполагался большой емкости без ограничения. Предметы труда поступали на обработку в соответствии с правилом FIFO с интенсивностью λ , распределенной по показательному закону. Скорость μ обработки предмета труда на операции распределена по тому же закону со средним значением времени обработки $1/\langle \mu \rangle = 0.5$ (часа). Использовались два вида

экспериментов, подтверждающие точность расчета с использованием PDE-модели: эксперименты при нарастании потока предметов труда, поступающего на обработку и эксперименты с убывающим потоком предметов труда. Если в течение достаточно длительного промежутка времени отклонения между параметрами поточной линии составляло менее 1%, предполагалось, что параметры поточной линии вышли на установившийся режим. Проведено несколько экспериментов для значений интенсивности поступления $\lambda = 0.5$, $\lambda = 1.0$, $\lambda = 1.5$ и $\lambda = 1.9$ (шт./час). Предполагалось, что система изначально находится в устойчивом состоянии. Проведено четыре эксперимента с переходом значения интенсивности $\lambda = 1.0$, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 1.8$ и $\lambda = 1.9$ (шт./час) до значения $\lambda = 0.5$. После достижения установившегося состояния для параметров технологического процесса эксперимент считался законченным. Для проверки соответствия PDE-моделей Lefebvre E., Berg R., Rooda J. использовали имитационную DES-модель управляемого производственного процесса. Указанный подход хорошо зарекомендовал себя в качестве метода моделирования и анализа производственных систем. DES-модель построена с использованием языка программирования, разработанного в Технологическом университете Эйндховена [26]. Для расчета средних значений параметров поточной линии для каждого варианта значений λ проведено 1 000 000 независимых имитаций процесса обработки партии деталей. Параметры PDE-модели вычислены с использованием метода Годунова. Данные экспериментов демонстрировали (рис.5), что для установившихся режимов работы поточной линии результаты расчета параметров для PDE- и DES-моделей совпадают. Совпадение следовало ожидать, так как для замыкания PDE-модели использовалась стационарная TQ-модель M/M/1-очереди [26]. Изучение поведения параметров поточной линии на неустоявшихся режимах показывают несовпадение результатов PDE- и DES-моделей в связи с тем, что значение скорости движения предметов труда представлено уравнением состояния, справедливым для стационарного случая.

Обзор современных публикаций показывает, что существующие PDE-модели [6, 12, 26] хорошо описывают установившиеся режимы, но не позволяют с той же точностью описать переходные режимы работы производственных линий.

Для повышения точности описания неустоявшихся режимов необходимо, с одной стороны, разработать PDE-модели, содержащие большое количество балансовых уравнений, с другой стороны разработать методы замыкания системы балансовых уравнений, в основу которых должен быть положен детально разработанный механизм воздействия оборудования на предмет труда.

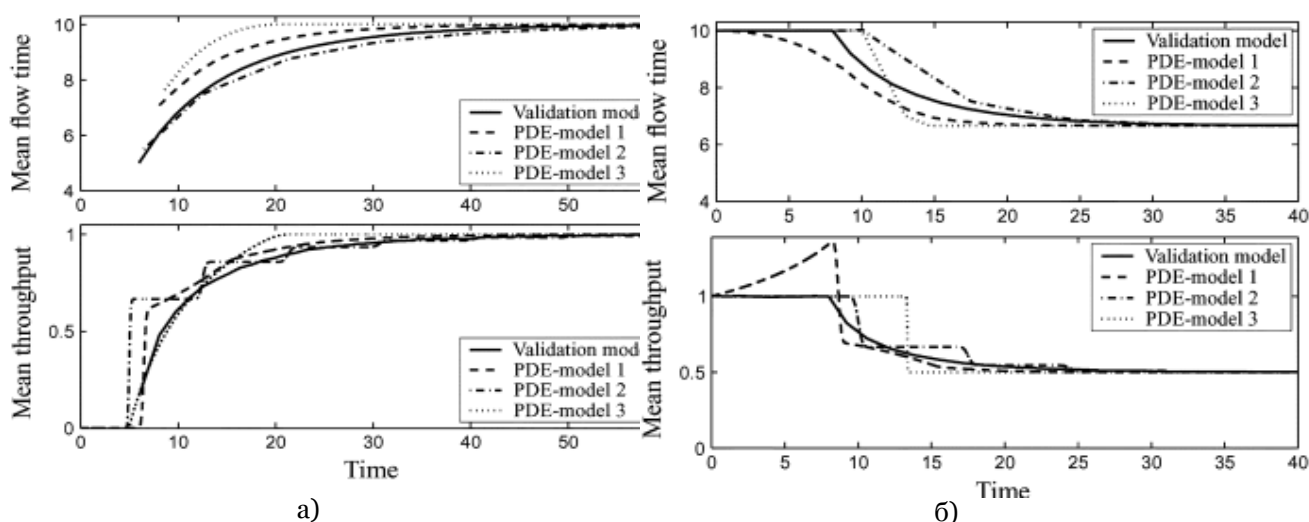


Рис. 5. Пропускная способность и время изготовления изделия [26]:

а) «разгон» с $\lambda = 0.0$ до $\lambda = 1.0$; б) «торможение» с $\lambda = 1.0$ до $\lambda = 0.5$

Fig. 5. Throughput and production time [26]:

а) "acceleration" with $\lambda = 0.0$ to $\lambda = 1.0$; б) "inhibition" with $\lambda = 1.0$ to $\lambda = 0.5$

Модели статистической динамики систем управления.

Статистическая теория систем управления основывается на теории вероятностей, математической статистике и динамике систем. Так как закономерности в случайных явлениях изучаются теорией вероятностей, то существенную часть аппарата статистической теории систем представляет аппарат теории вероятностей. основополагающие работы теории вероятностей и математической статистике принадлежат Колмогорову А.Н. [30], Хинчину А.Я. [31], Винеру Н., Романовскому В.И., Слуцкому Е.Е., Смирнову И.В., Гнеденко Б.В. Развитие теории кинетических уравнений предоставила мощный инструмент для решения практических задач [32, 33]. Кинетическое уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК-уравнение), применяемое для исследования случайных процессов в нелинейных системах управления, положило начало современной статистической теории оптимальных систем управления. Физическая постановка задачи о статистическом рассмотрении динамических систем, связанная с ФПК-уравнением, опубликована Фоккером А. (Нидерланды), Планком М. (Германия), Колмогоровым А.Н., Андроновым А.А., Понтрягиным Л.С. [34]. Котельников В.А. положил начало развитию теории статистически оптимальных нелинейных систем. Понтрягин Л.С. разработал принцип максимума, на основе которого получены результаты по оптимизации систем управления, рассмотрел в статистической постановке задачу оптимального управления [34]. Изложение статистической теории оптимальных динамических систем представлено в работах [35, 36]. Методы принципа максимума Понтрягина и динамического программирования Белламана оказали значительное влияние на развитие статистической теории оптимальных систем управления. Теория стационарных случайных процессов применительно к статистическому исследованию систем управления исследована Хинчиным А.Я.. Результаты современной статистической теории динамических систем, описывающей влияние случайных воздействий на постоянные и переменные параметры системы, изложены Пугачевым В.С. [37]. Пугачев В.С. [242] и Хинчин А.Я. построили прикладную теорию случайных функций. Солодовскому В.В. принадлежит постановка и решение ряда задач статистической оптимизации и синтеза систем управления [35]. Им развита статистическая теория адаптивных систем управления, сформированы принципы и разработана концепция автоматизированного проектирования сложных систем управления технологическими процессами. Солодовский В.В. систематизировал методы статистического расчета линейных динамических систем с постоянными параметрами для установившихся режимов [35]. Значительный вклад в развитие статистических методов исследования динамических систем принадлежат Росину М.Ф., Фишеру Р., Пирсону Е., Крамеру Г., Нейману Д., Вальду А., Винеру Н..

Развитие производственных систем происходит в условиях, когда тысячи созданных разнородных технологических процессов не могут существовать без оптимального управления. Потребности в точных и надежных моделях оптимального управления намного опережают разработку детального математического аппарата для описания технологических процессов. Современные предприятия нуждаются не только в оптимальных, но и в адаптивных оптимальных



алгоритмах управления, обеспечивающих наилучший в смысле некоторого критерия качества результат в условиях неполного знания состояния параметров технологического процесса и случайных воздействий на его параметры окружающей средой. Приспособленность производственных предприятий к непредвиденным условиям является характерной чертой развития современной промышленности. Статистические методы и построение на основе их устойчивых оптимальных алгоритмов управления имеют в современных условиях большое значение [3,13]. Такие алгоритмы позволяют снизить требования к точности описания управляемых технологических процессов, упростить процесс проектирования систем управления. В универсальных алгоритмах оценивания, идентификации и управления параметрами технологических процессов все чаще используют метод функций Ляпунова [3,13]. Задача создания устойчивых оптимальных систем управления представляется настолько важной, что почти все направления современной теории управления ставят перед собой эту задачу. Часто оптимальная программа изменения режимов производственного процесса считается известной, определяется на стадии проектирования. Задача оптимального управления заключается в выполнении этой программы и стабилизации программного движения [3, 38]. При этом допускаются лишь малые отклонения от заданного программой состояния параметров технологического процесса.

Автоматизация производства требует широкого внедрения в производственный процесс вычислительной техники и использования новейших принципов управления без участия работника. При построении моделей управления параметрами производственных процессов принято различать разомкнутые и замкнутые системы управления [3, 35]. Разомкнутая система управления обеспечивает изменение состояние предметов труда по заданному закону, не зависящему от предыдущих результатов управления. Замкнутые системы управления параметрами производственного процесса используют информацию о результатах управления и формируют управляющее воздействие в зависимости от того, в каком состоянии находятся предметы труда. Принцип обратной связи является основой управления параметрами производственных процессов почти во всех автоматических и полуавтоматических современных поточных линиях. Это объясняется тем, что на объекты управления в ходе функционирования действуют случайные, заранее не известные возмущения или помехи, вызывающие случайные изменения параметров управляемого производственного процесса, которые не соответствуют программным. В теории управления производственными процессами объекты и системы управления, как правило, рассматриваются с функциональной точки зрения. При этом важными являются функциональные связи в системе, характеризующие качество ее работы. Критерии, применяемые в теории организации производства, имеют количественные характеристики. Такой подход дает возможность развить единую теорию систем управления производственными процессами, основанную на общности уравнений, описывающих технологические явления [1, 2]. Учет факторов энергетики, экономики, надежности, сложности, характеризующих системы управления технологическими процессами, возможен на основе использования критериев и их математической формализации. Состояние производственной системы в общем случае характеризуется большим числом переменных, определяющих состояние отдельного предмета труда [3]. Существенными являются небольшое число агрегированных переменных. В статистической постановке процесс управления параметрами технологического процесса зависит от наличия случайных факторов и характеризуется статистическими характеристиками.

Изучение поведения параметров управляемого производственного процесса в общем случае сводится к изучению преобразования статистической системой управления случайных входных параметров технологического процесса в случайные выходные параметры. Процессы переноса технологических ресурсов на предмет труда описываются статистическими характеристиками. Если известны полные статистические характеристики входных параметров технологического процесса и динамические свойства производственной системы, то изучаемый процесс управления будет вполне определен в статистическом смысле, т.е. могут быть найдены соответствующие статистические характеристики выходных параметров. Однако нередко статистическая информация о входных параметрах производственного процесса и динамических свойствах производственной системы является недостаточной для определения характеристик выходных параметров. В таком случае процесс управления в условиях статистической неопределенности изучается на основе принципа гарантированного результата, заключающегося в том, что выходной результат будет обеспечен при любых возможных исходах. Статистическая модель управления определяет зависимость статистических характеристик выходных параметров технологического процесса от статистических характеристик его входных параметров, с помощью которых оценивается надежность, точность и пропускная способность поточной линии [3, 256].

К настоящему времени наиболее разработанной частью статистической теории управления динамическими системами является раздел, в котором изучаются свойства линейных автоматических систем управления производственными процессами [3, 13, 25]. Многие нелинейные системы с достаточной точностью могут быть представлены линейными. Необходимо отметить, что, хотя общие формулы статистических характеристик входных и выходных параметров записываются в сравнительно простой форме, использование этих формул при решении конкретных задач обычно связано со значительными трудностями. Эти трудности возрастают при определении статистических характеристик параметров динамической системы для переходных режимов [35].

Основным аппаратом анализа и синтеза статистических систем управления являются кинетические уравнения [3, 13]. Математической теории непрерывных процессов, связанных с этими уравнениями, посвящена обширная литература. Связь кинетического уравнения с первыми интегралами динамической системы управления параметрами производственного процесса позволяет для некоторых случаев получить частное решение. В общем случае для решения кинетического уравнения используют метод моментов [3, 32, 33, 36]. Бесконечная система дифференциальных уравнений в частных производных для моментов функции распределения замыкается при помощи введения последовательности функций распределения, содержащий малый параметр. Метод предоставляется эффективным, особенно при изучении начальной фазы переходных производственных процессов. Широко применяется при решении кинетического уравнения методы теории возмущений [3, 32, 33, 36]. Переходные процессы в динамических производственных системах вызываются начальными отклонениями или внешними возмущающими воздействиями. Во многих работах, изучающих переходные процессы в динамических производственных системах, начальные условия для параметров считаются детерминированными. Между тем реальные начальные условия и внешние воздействия всегда в той или иной мере случайны. Статистические методы изучения переходных процессов в системах управления используют такие понятия теории информации, как энтропия системы [33]. С использованием кинетических уравнений [3, 26, 38] формулируются и решаются задачи построения динамических систем управления, в которых важное значение имеет статистическая устойчивость. Использование прямого метода Ляпунов и понятия об энтропии производственной системы [35] позволяет получить необходимые и достаточные условия устойчивости системы. Большое значение при этом приобретает способ построения уравнений для моментов. Существующие методы статистической динамики систем управления предоставляют мощный аппарат, который может быть использован для построения PDE-моделей систем управления и стабилизации параметров производственной линии

Заключение

В современных условиях жизненный цикл продукта для предприятия с поточным типом организации производства является коротким. В связи с этим производственная линия функционирует большую часть жизненного цикла в неустойчивом переходном режиме. Если для переходного режима поточной линии не выполняются критерии устойчивости, то использование DES-модели для описания поточной линии является затруднительным. Результат моделирования в значительной степени становится зависимым от выбранной вычислительной схемы. Возникающие в пределах горизонта планирования возмущения потоковых параметров делают рассчитанный с помощью такой модели оптимальный план производства недействительным.

PDE-модели является новым и перспективным направлением построения моделей производственных процессов, используемых при проектировании систем управления поточными линиями. Однако, хотя представленные результаты использования PDE-моделей в задачах планирования и управления производством являются многообещающими, все же необходимы дополнительные исследования, позволяющие выявить истинную ценность PDE-модели для построения систем управления производственными линиями. PDE-модели более полно позволяют описать поведение параметров производственных линий по сравнению с TQ-моделями, существенно менее громоздки и трудоемки по сравнению с DES-моделями. Использование для исследования производственных процессов аппарата статистической теории динамических систем и методов статистической физики позволяет изучить особого типа закономерности, которым подчиняется поведение и свойства производственных систем, состояние которых определяется состоянием большого числа элементов – предметов труда. Результаты расчета параметров поточной линии, полученные с помощью PDE- и DES-моделей, показали сравнительно высокую точность совпадения расчетов для установившегося режима и неудовлетворительную для



переходного режима. Таким образом, проведенный в статье обзор и краткий анализ моделей управляемых производственных процессов, функционирующих в переходных режимах, а также обзор основных типов моделей в работе [2] позволяет сформулировать основные направления исследования производственных систем с поточным методом организации производства, функционирующих в переходных режимах:

а) разработка детального предметно-технологического описания управляемого производственного процесса, основанного, на стохастическом механизме переноса технологических ресурсов на предмет труда в результате воздействия оборудования в ходе выполнения технологической операции, позволяющем моделировать производство продукции нескольких номенклатур разными технологическими способами в условиях совместного использования ресурсов и производственного оборудования;

б) разработка аналитических методов проектирования в фазовом пространстве состояний траекторий предметов труда для построения эффективных предметно-технологических моделей управляемых производственных процессов, описывающих движение партии предметов труда по технологическому маршруту поточной линии, фундаментом которых являются законы сохранения, характеризующие процесс переноса ресурсов на предмет труда;

в) разработка потокового описания управляемого производственного процесса, основанного на кинетическом представлении технологического процесса;

г) разработка методов проектирования систем управления параметрами поточных линий, основанных на многомоментной двухуровневой PDE-модели описания управляемого производственного процесса для переходных режимов.

Список литературы References

1. Пигнастый, О. М. О новом классе динамических моделей поточных линий производственных систем / О. М. Пигнастый // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2014. – №15(186). – вып.31/1. – С. 147-157.

Pignastyj, O. M. O novom klasse dinamicheskikh modelej potocznyh linij proizvodstvennyh sistem / O. M. Pignastyj // Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika. – 2014. – №15(186). – вып.31/1. – С. 147-157.

2. Пигнастый, О. М. Обзор моделей управляемых производственных процессов поточной линии производственных систем / О. М. Пигнастый // Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. – 2015. – №7(204). – вып.34/1. – С. 137-152.

Pignastyj, O. M. Obzor modelej upravljajemyh proizvodstvennyh processov potocznoj linii proizvodstvennyh sistem / O. M. Pignastyj // Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Jekonomika. Informatika. – 2015. – №7(204). – вып.34/1. – С. 137-152.

3. Пигнастый О. М. Статистическая теория производственных систем / О. М. Пигнастый. - Харків: ХНУ, 2007. - 388 с.

Pignasty O. M. Statisticheskaja teorija proizvodstvennyh sistem / O. M. Pignasty. - Harkiv: HNU, 2007. - 388 s.

4. Акиншин Л. 2010. Компоненты и технологии. Электронный журнал. URL: http://www.kit-e.ru/articles/build_in_systems/2010_07_130.php (июль, 2010).

Akinshin L. 2010. Komponenty i tehnologii. Jelektronnyj zhurnal. URL: http://www.kit-e.ru/articles/build_in_systems/2010_07_130.php (accessed july' 2010).

5. Габитов М. 2010. 3DNews. Электронный журнал. URL: <http://www.3dnews.ru/609009> (2 апреля 2011).

Gabitov M. 2010. 3DNews. Jelektronnyj zhurnal. URL: <http://www.3dnews.ru/609009> (accessed 02 April 2011).

6. Armbruster D. Continuous models for production flows. / D. Armbruster, C. Ringhofer, Jo T-J. // In Proceedings of the 2004 American Control Conference. – Boston, MA, USA. – 2004. – P. 4589 – 4594.

Armbruster D. Continuous models for production flows. / D. Armbruster, C. Ringhofer, Jo T-J. // In Proceedings of the 2004 American Control Conference. – Boston, MA, USA. – 2004. – P. 4589 – 4594.

7. Armbruster D. Kinetic and fluid model hierarchies for supply chains supporting policy attributes / D. Armbruster., D. Marthaler, C. Ringhofer // Bulletin of the Institute of Mathematics. – Academia Sinica, – 2006. – P. 496 – 521.

Armbruster D. Kinetic and fluid model hierarchies for supply chains supporting policy attributes / D. Armbruster., D. Marthaler, C. Ringhofer // Bulletin of the Institute of Mathematics. – Academia Sinica, – 2006. – P. 496 – 521.

8. Kimemia J. An algorithm for the computer control of a flexible manufacturing system / J. Kimemia, S. Gershwin // IIE Trans. – 1983. – vol. 15, no. 4. – P. 353 – 362.

Kimemia J. An algorithm for the computer control of a flexible manufacturing system / J. Kimemia, S. Gershwin // IIE Trans. – 1983. – vol. 15, no. 4. – P. 353 – 362.



9. Jacobs J.H. Characterization of the operational time variability using effective processing times / Jacobs J.H., Etman L.F., Campen E.J., Rooda J.E. // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. – 2003. – vol. 16, №. 3. – P. 511 – 520
- Jacobs J.H. Characterization of the operational time variability using effective processing times / Jacobs J.H., Etman L.F., Campen E.J., Rooda J.E. // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. – 2003. – vol. 16, №. 3. – P. 511 – 520
10. Riano G. Transient behavior of stochastic networks: Application to production planning with load-dependent lead times / G.Riano // – Atlanta, 2003. – 556 p.
- Riano G. Transient behavior of stochastic networks: Application to production planning with load-dependent lead times / G.Riano // – Atlanta, 2003. – 556 p.
11. Selcuk B. Work in Process Clearing in Supply Chain Operations Planning / B.Selcuk, J.Fransoo, A. De Gok // IIE Transactions. – France. – 2007. – P. 206 – 220.
- Selcuk B. Work in Process Clearing in Supply Chain Operations Planning / B.Selcuk, J.Fransoo, A. De Gok // IIE Transactions. – France. – 2007. – P. 206 – 220.
12. Armbruster D. Kinetic and fluid model hierarchies for supply chains. / D. Armbruster., D. Marthaler, C. Ringhofer // SIAM Multiscale Model Simul. – 2004. – №1. – P. 43 – 61
- Armbruster D. Kinetic and fluid model hierarchies for supply chains. / D. Armbruster., D. Marthaler, C. Ringhofer // SIAM Multiscale Model Simul. – 2004. – №1. – P. 43 – 61
13. Lefeber E. Modeling, Validation and Control of Manufacturing Systems / E.Lefeber, R.A.Berg, J.E. Rooda // – Proceeding of the 2004 American Control Conference. – Massachusetts. – 2004. – P. 4583 – 4588.
- Lefeber E. Modeling, Validation and Control of Manufacturing Systems / E.Lefeber, R.A.Berg, J.E. Rooda // – Proceeding of the 2004 American Control Conference. – Massachusetts. – 2004. – P. 4583 – 4588.
14. Missbauer H. Order release planning with clearing functions: a queueing - theoretical analysis of the clearing function concept / H.Missbauer. – New York, 2009. – 355 p.
- Missbauer H. Order release planning with clearing functions: a queueing - theoretical analysis of the clearing function concept / H.Missbauer. – New York, 2009. – 355 p.
15. Armbruster D. The production planning problem: Clearing functions, variable leads times, delay equations and partial differential equations / D. Armbruster, K. G. Kempf // Decision Policies for Production Networks. – Springer Verlag. – 2012. – P. 289 – 303.
- Armbruster D. The production planning problem: Clearing functions, variable leads times, delay equations and partial differential equations / D. Armbruster, K. G. Kempf // Decision Policies for Production Networks. – Springer Verlag. – 2012. – P. 289 – 303.
16. Bramson M. Stability of queueing networks / M.Bramson–Springer, 2008.–1950.–189 p.
- Bramson M. Stability of queueing networks / M.Bramson–Springer, 2008.–1950.–189 p.
17. Dai J.G. Stability and instability of a two-station queueing network/ J.J.Hasenbein, J.H.Vate - The Annals of Applied Probability. – 2004. – T. 14. – №. 1. – C. 326-377.
- Dai J.G. Stability and instability of a two-station queueing network/ J.J.Hasenbein, J.H.Vate - The Annals of Applied Probability. – 2004. – T. 14. – №. 1. – C. 326-377.
18. Dai J.G., Stability and Instability of Fluid Models for Reentrant Lines / J.G. Dai, G.Weiss // Mathematics of Operations Research. –1996. – №21. – P.115–134.
- Dai J.G., Stability and Instability of Fluid Models for Reentrant Lines / J.G. Dai, G.Weiss // Mathematics of Operations Research. –1996. – №21. – P.115–134.
19. Ramadge P. The control of discrete event systems / P. Ramadge, W. Wonham. // Proceedings of the IEEE. – 1989. – V.77. – №1. – P. 81 – 98.
- Ramadge P. The control of discrete event systems / P. Ramadge, W. Wonham. // Proceedings of the IEEE. – 1989. – V.77. – №1. – P. 81 – 98.
20. Cassandras C.G. Perturbation analysis for on-line control and optimization of stochastic fluid models / C.G.Cassandras, Y. Wardi, B.Melamed, IEEE Trans. Automat. Contr., V47, pp. 1234–1248
- Cassandras C.G. Perturbation analysis for on-line control and optimization of stochastic fluid models / C.G.Cassandras, Y. Wardi, B.Melamed, IEEE Trans. Automat. Contr., V47, pp. 1234–1248
21. Harrison J. Brownian Motion and Stochastic Flow Systems. / J. Harrison. – New York, 1995. – 142 p.
- Harrison J. Brownian Motion and Stochastic Flow Systems. / J. Harrison. – New York, 1995. – 142 p.
22. Berg R. Modelling and Control of a Manufacturing Flow Line using Partial Differential Equations. / R. Berg, E. Lefeber, J. Rooda // IEEE Transactions on Control
- Berg R. Modelling and Control of a Manufacturing Flow Line using Partial Differential Equations. / R. Berg, E. Lefeber, J. Rooda // IEEE Transactions on Control
23. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия / Дж. Форрестер. – М.: Прогресс, 1961. – 341 с.
- Forrester Dzh. Osnovy kibernetiki predpriyatiya / Dzh. Forrester. – M.: Progress, 1961. – 341 s. (in Russian)
24. Marca M. Control of Continuum Models of Production Systems / M.Marca, D.Armbruster, M. Herty// IEEE Trans. Automatic Control. – 2010. – №11. – P. 2511 – 2526.
- Marca M. Control of Continuum Models of Production Systems / M.Marca, D.Armbruster, M. Herty// IEEE Trans. Automatic Control. – 2010. – №11. – P. 2511 – 2526.
25. Zhang Liang. System-theoretic properties of Production Lines: A dissertation submitted the degree of Doctor of Philosophy / Zhang Liang. – Michigan, 2009. – 289 p.
- Zhang Liang. System-theoretic properties of Production Lines: A dissertation submitted the degree of Doctor of Philosophy / Zhang Liang. – Michigan, 2009. – 289 p.



26. Berg R. Partial differential equations in modelling and control of manufacturing systems / R. Berg. – Netherlands, Eindhoven Univ. Technol., 2004. – 157 p.
- Berg R. Partial differential equations in modelling and control of manufacturing systems / R. Berg. – Netherlands, Eindhoven Univ. Technol., 2004. – 157 p.
27. Lighthill M.J. On kinematic waves. II: A theory of traffic flow on long crowded roads. / M.J. Lighthill, G.B. Whitham // *Proceedings of the Royal Society* – 1955. – P. 317–340.
- Lighthill M.J. On kinematic waves. II: A theory of traffic flow on long crowded roads. / M.J. Lighthill, G.B. Whitham // *Proceedings of the Royal Society* – 1955. – P. 317–340.
28. Lefebvre E. Nonlinear models for control of manufacturing systems / E. Lefebvre // *Proceedings of the 4th International Symposium Investigations of Non-Linear Dynamic Effects in Production System*. – Chemnitz. – 2004. P. 69 – 81.
- Lefebvre E. Nonlinear models for control of manufacturing systems / E. Lefebvre // *Proceedings of the 4th International Symposium Investigations of Non-Linear Dynamic Effects in Production System*. – Chemnitz. – 2004. P. 69 – 81.
29. Lefebvre E. Aggregate modeling of manufacturing systems. Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise / E. Lefebvre, D. Armbruster, eds. K. Kempf P. Keskinocak, R. Uzsoy // – New York: Springer-Verlag. – 2010. – V. 151. – P. 509 – 536.
- Lefebvre E. Aggregate modeling of manufacturing systems. Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise / E. Lefebvre, D. Armbruster, eds. K. Kempf P. Keskinocak, R. Uzsoy // – New York: Springer-Verlag. – 2010. – V. 151. – P. 509 – 536.
30. Колмогоров А. Н. О статистических методах в теории вероятностей / А. Н. Колмогоров // *Успехи математических наук*. – 1938. – №5. – С. 5 – 41.
- Kolmogorov A. N. O statisticheskikh metodah v teorii veroyatnostej / A. N. Kolmogorov // *Uspеhi matematicheskikh nauk*. – 1938. – №5. – С. 5 – 41.
31. Хинчин А. Я. Математические основания статистической механики / А. Я. Хинчин. – М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2003. – 128 с.
- Hinchin A. Ja. Matematicheskie osnovaniya statisticheskoy mehaniki / A. Ja. Hinchin. – М.: Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika, 2003. – 128 s.
32. Боголюбов Н. Н. Проблемы динамической теории в статистической физике / Н. Н. Боголюбов. – М.: ОГИЗ, 1946. – 120 с
- Bogoljubov N. N. Problemy dinamicheskoy teorii v statisticheskoy fizike / N. N. Bogoljubov. – М.: OGIЗ, 1946. – 120 s
33. Либов Р. Введение в теорию кинетических уравнений / Р. Либов. – М.: Изд-во Мир, 1974. – 372 с.
- Libov R. Vvedenie v teoriju kineticheskikh uravnenij / R. Libov. – М.: Izd-vo Mir, 1974. – 372 s.
34. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 392 с.
- Pontrjagin L. S. Matematicheskaja teorija optimal'nyh processov / L. S. Pontrjagin, V. G. Boltjanskij, R. V. Gamkrelidze – М.: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1983. – 392 s.
35. Солодовников В. В. Введение в статистическую динамику систем управления. / В. В. Солодовников. – М.: ГИТЛит, 1952. – 368 с.
- Solodovnikov V. V. Vvedenie v statisticheskuyu dinamiku sistem upravlenija. / V. V. Solodovnikov. – М.: GITLit, 1952. – 368 s.
36. Красовский А. А. Статистическая теория переходных процессов / А. А. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 240 с.
- Krasovskij A. A. Statisticheskaja teorija perehodnyh processov / A. A. Krasovskij. – М.: Nauka, 1968. – 240 s.
37. Пугачев В. С. Основы статистической теории автоматических систем / В. С. Пугачев, И. Е. Казаков, Л. Г. Евланов. – М.: Машиностроение, 1974. – 400 с.
- Pugachev V. S. Osnovy statisticheskoy teorii avtomaticheskikh sistem / V. S. Pugachev, I. E. Kazakov, L. G. Evlanov. – М.: Mashinostroenie, 1974. – 400 s.
38. Пигнастый О. М. Задача оптимального оперативного управления макропараметрами производственной системы с массовым выпуском продукции / О. М. Пигнастый // *Доповіді Національної академії наук України*. – Київ: Видавничий дім "Академперіодика". – 2006. – №5 – С. 79 – 85.
- Pignasty O. M. Zadacha optimal'nogo operativnogo upravlenija makroparametrami proizvodstvennoy sistemy s massovym vypuskom produkcii / O. M. Pignasty // *Dopovidi Nacional'noї akademії nauk Ukraїni*. – Кіїв: Vidavnichij dim "Akademperiodika". – 2006. – №5 – S. 79 – 85.
39. Азаренков Н. А. О законе возрастания энтропии технологического процесса. / Н. А. Азаренков, О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // *Доповіді Національної академії наук України*. – Київ: Видавничий дім "Академперіодика". – 2012. – №5 – С. 32–37.
- Azarenkov N. A. O zakone vozrastanija jentropii tehnologicheskogo processa. / N. A. Azarenkov, O. M. Pignastyj, V. D. Hodusov // *Dopovidi Nacional'noї akademії nauk Ukraїni*. – Кіїв: Vidavnichij dim "Akademperiodika". – 2012. – №5 – S. 32–37.